中国生态农业学报 2016 年 5 月 第 24 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2016, 24(5): 572−581

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150995

不同施氮水平对返青期水分胁迫下冬油菜补偿效应的影响*

谷晓博 李援农** 杜娅丹 吴国军 周昌明 任全茂 杨 丹

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院/旱区农业水土工程教育部重点实验室 杨凌 712100)

摘 要 为确定甘蓝型冬油菜在返青期水分胁迫条件下的适宜施氮量及其对水分胁迫的补偿效应，本文采用桶栽试验方法，在返青期设置每桶施纯氮 0 g(N_0)、0.2 g(N_1)、0.4 g(N_2)、0.6 g(N_3)和 0.8 g(N_4)5 个施氮水平(折合为 0 kg·hm^{-2}、30 kg·hm^{-2}、60 kg·hm^{-2}、90 kg·hm^{-2}、120 kg·hm^{-2})及水分亏缺(D, 土壤含水率为 50%~55%田间持水率)和充分供水(W, 土壤含水率为 70%~80%田间持水率)，研究施氮量对返青期水分胁迫后复水冬油菜生长指标、叶绿素含量、光合速率、籽粒产量和水分利用效率的补偿效应，并对不同处理下各指标利用主成分分析进行评价。结果表明，在相同水分条件下，地上部干物质量、叶绿素含量、光合速率、籽粒产量和水分利用效率均随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势，并在 N_3 达到最大。返青期干旱胁迫后复水，各施氮处理冬油菜的地上部干物质量、叶绿素含量、光合速率、产量及产量构成均表现出一定程度的补偿效应，补偿效果随施氮量的增加先增加后降低，在 N_3 施氮量下补偿效果最好。在 N_3 施氮水平下, D 处理冬油菜的各生长指标、叶绿素含量和籽粒产量均与 W 处理无显著差异，表现为等效补偿效果；而 D 处理冬油菜初花期的光合速率显著大于 W 处理，表现为超补偿效果。N_3D 处理的产量比 N_3W 处理降低 2.2%，水分利用效率提高 3.8%。氮肥偏生产力和油菜籽粒的含油率均随施氮量的增加而降低；油菜籽粒的蛋白质含量随施氮量的增加而增加。与 N_0 相比，2 种水分处理下 N_3 的平均氮肥偏生产力降低 6.2%，籽粒含油率降低 13.0%，但产量提高 87.6%，水分利用效率提高 32.9%，籽粒的蛋白质含量提高 24.6%。对各指标进行主成分分析发现，N_3D 处理的主成分分析综合得分最高。由此可见, N_3D 处理对促进冬油菜生长，提高产量和水分利用效率，保证品质的综合效果最好。

关键词 冬油菜 返青期 施氮量 水分胁迫 品质 水分利用效率 补偿效应

中图分类号: S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0572-10

Compensative impact of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) affected by water stress at re-greening stage under different nitrogen rates*

GU Xiaobo, LI Yuannong**, DU Yadan, WU Guojun, ZHOU Changming, REN Quanmao, YANG Dan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University / Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of the Ministry of Education, Yangling 712100, China)

Abstract Oilseed rape is one of the most important oil crops cultivated on over 6.5 million hectares of land in China. Although mainly cultivated in the Yangtze River Basin, rising winter temperatures in northern China in recent years have made possible to expand the cultivation area of oilseed rape northward and westward. The planting area of winter oilseed rape in Northwest China has increased year by year. Irrigation and nitrogen supply at re-greening stage is important for flower bud differentiation and branch number increase of oilseed rape. However, drought stress is usually frequent at re-greening stage in

* 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503105, 201503125)和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA100504)资助

** 通讯作者: 李援农，主要研究方向为节水灌溉新技术及 3S 技术应用研究。E-mail: liyuannong@163.com
谷晓博，主要研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail: gxb123027@163.com

收稿日期: 2015−09−13 接受日期: 2016−01−16

* The study was supported by the Special Funds for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201503105 and 201503125), and the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program, No. 2011AA100504).

** Corresponding author, E-mail: liyuannong@163.com

Received Sep. 13, 2015; accepted Jan. 16, 2016

most regions of Northwest China. Local farmers apply irrigation and nitrogen to oilseed rape fields for high seed yields, but such effect has not been obvious, resulting in various environmental problems. Therefore determining an appropriate nitrogen dose under drought at re-greening stage is important for the production of oilseed rape in Northwest China. Barrel experiments, including 5 nitrogen application rates [0 g (N_0), 0.2 g (N_1), 0.4 g (N_2), 0.6 g (N_3) and 0.8 g (N_4)] and two water treatments [full water (W, 70%–80% of field water capacity) and deficit water (D, 50%–55% of field water capacity)] at re-greening stage were conducted to measure growth and physiological index, yield components, water use efficiency (WUE) and quality traits of oilseed rape. The study used principal component analysis (PCA) to analyze and evaluate the parameters under different treatments. Results showed that aboveground dry matter, chlorophyll content, photosynthetic rate, seed yield and WUE first increased and then decreased with increasing nitrogen application rate. Then aboveground dry matter, chlorophyll content, photosynthetic rate, seed yield and WUE all reached the maximal level under N_3 treatment with the same water conditions. After drought stress and re-watering, shoot dry matter weight, chlorophyll content, photosynthetic rate, yield and yield components of all nitrogen treatments showed certain degree of compensative effect. The compensative effect intensified first and weakened then with N application rate, which was best under N_3 treatment. No significant differences were noted in growth indexes, chlorophyll content and seed yield between W and D treatments. Photosynthetic rate under D treatment was significantly higher than that under W treatment with N_3. Seed yield reduced by 2.2% and WUE increased by 3.8% in D treatment compared to that of W treatment with N_3 nitrogen application. Nitrogen partial factor productivity and seed oil content decreased with increasing nitrogen amount, while seed protein content showed the reverse trend. Compared with N_0, average partial factor productivity and seed oil content in N_3 treatment decreased by 6.2% and 13.0%, but yield and WUE increased by 87.6% and 32.9%, respectively. Based on PCA for each indicators, we found that the highest PCA score occurred in N_3D treatment. Therefore, the N_3D treatment was optimized measure for increasing WUE, yield and quality of oilseed rape in northwest China.
Keywords Winter oilseed rape; Re-greening stage; Nitrogen application rate; Water stress; Seed quality; Water use efficiency; Compensative effect

油菜(*Brassica napus*)是我国具有传统优势的重要油料作物，种植面积超过 650 万 hm^2，是我国第一大油料作物，加强油菜生产技术研究对确保我国食用油安全具有重要意义[1−2]。近年来我国气候发生显著变化，冬油菜种植北界明显北移，呈“北移、西扩”趋势，种植区明显向高纬度、高海拔地区发展，西北地区油菜种植面积不断扩大[2−3]。返青期的水氮供应关系到油菜后期的花芽分化和分枝数量，进而影响油菜产量。在冬油菜返青期，西北大部分地区的降雨很少，当地经常采用大定额春灌，且配施大量氮肥，传统的灌溉和施肥方式不仅没有提高油菜产量，而且导致生态系统氮循环严重失调，土壤板结，造成巨大的资源浪费。因此，如何在干旱胁迫条件下，确定作物适宜的施氮量，实现水肥协同效应和激励机制，最大限度地提高水分和养分的利用效率，对我国西北干旱半干旱地区农业的可持续发展具有重要的现实意义。

水分胁迫的补偿效应是指作物受到阈值内的水分胁迫后，在具有恢复因子(复水)和过程(时间)条件下，表现出在生理生化和农艺指标上有利于作物生长、产量提高和品质改善的能力[4]，超补偿效应就是作物在经历一定的水分亏缺条件改善后所再现出的生长指标、生理指标和产量等方面显著提高的超常效应。水分亏缺是作物生长环境中普遍存在的一种逆境胁迫[5]，但并不是每种作物、每个生育期、任何程度的水分亏缺都会对作物造成伤害和减产，某一生育阶段适度的水分胁迫后复水，作物在生理生化代谢和生长发育等方面有一定的调节作用[6−7]，作物存在短暂的快速生长，水分胁迫阶段受到的损失可以得到部分补偿或超补偿[8]。前人研究表明，水分胁迫可以增强披针叶茴香(*Illicium lanceolatum*)幼苗叶片对强光的敏感性，且复水后能够暂时性恢复植株的光合能力[9]。花生(*Arachis hypogaea*)苗期适度干旱后复水，叶片光合性能迅速恢复且在不影响产量的前提下降低耗水量，提高花生的水分利用效率[10]。作物补偿效应的产生不仅发生在干旱复水条件下，在干旱后增加肥料使用如氮肥也可以产生补偿效应，通过施肥来补充土壤营养物质不仅能解除水分胁迫因子的影响，而且通过调节作物的生理过程，有效地提高作物产量和水分利用效率，补偿因水分不足而造成的损失[11]。李世清等[12]研究表明，水分胁迫后，气孔阻力增加，叶绿素含量和净光合速率显著下降。但在胁迫时施用氮肥，蒸腾速率减弱，叶绿素含量、叶片吸光强度和净光合速率增加，致使短时水分利用效率显著提高。但同时也有研究指出在土壤水分有限的条件下，增施氮肥会使作物的水分胁迫加重，对产量造成不利影响[13]。目前，关于施肥对干旱、复水后作物的生长发育及产量形成

依然存在较大分歧，这可能是由于作物种类、水分胁迫时期和程度、施肥量不同而造成的。因此，确定不同作物在不同生育时期受到不同程度的水分胁迫后复水的适宜施氮量对作物节水增产非常重要。

关于不同供氮水平及水分调控条件下作物生理生态方面的研究已有报道[14−15]，但很少是以冬油菜为研究对象。本文以甘蓝型冬油菜‘陕油 107 号’为试验材料，在桶栽条件下，研究返青期不同的施氮量对该阶段水分胁迫后复水冬油菜在生理生长、产量和品质性状的补偿效应，以期为甘蓝型冬油菜在返青期调亏灌溉条件下确定合理的施氮量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

冬油菜桶栽试验于 2013 年 9 月 12 日—2014 年 5 月 22 日在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室遮雨棚下进行。该区地处 34°20′N，108°24′E，海拔高度 521 m，属暖湿带季风半湿润气候区，年均日照时数 2 163.8 h，无霜期 210 d。供试土壤为取自试验站农田 0~20 cm 耕层的土壤，质地为壤土，田间持水率为 24%(质量含水率，下同)，凋萎含水率为 8.5%。土壤经自然风干、磨细、过 5 mm 筛后备用。供试土壤基本理化性状为：有机质 11.36 $g\cdot kg^{-1}$，全氮 0.83 $g\cdot kg^{-1}$，硝态氮 60.27 $mg\cdot kg^{-1}$，速效磷 18.30 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾 135.73 $mg\cdot kg^{-1}$，pH 8.13。

1.2 试验材料与设计

供试冬油菜品种为‘陕油 107 号’，由西北农林科技大学农学院提供。供试氮肥为尿素(含 N≥46%)，磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5≥16%)。试验用塑料桶规格为：上边缘内径 29.5 cm，下边缘内径 22.5 cm，高 25.2 cm。

在冬油菜返青期设施氮(N)量和水分处理 2 个因素。施纯 N 量设 5 个水平：每桶施 N 0 g、0.2 g、0.4 g、0.6 g 和 0.8 g，折合为 0 $kg\cdot hm^{-2}$、30 $kg\cdot hm^{-2}$、60 $kg\cdot hm^{-2}$、90 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 120 $kg\cdot hm^{-2}$，分别记为 N_0、N_1、N_2、N_3、N_4。水分设 2 个水平：充分供水[W，土壤含水率保持在田间持水率(FWC)的 70%~80%]、水分胁迫(D，水分胁迫期间土壤含水率保持在 50%~55% FWC)，胁迫阶段为返青期(150~182 DAS，DAS：播种后天数)。各处理重复 9 次，完全随机区组设计。胁迫结束后，土壤含水率恢复至 70%~80% FWC。各处理均分别基施 0.6 g 的纯 N 和 P_2O_5。

试验前在桶底部均匀打 9 个半径约 0.5 cm 的小孔，并铺有纱网和 500 g 细砂，以调节下层土壤通气状况和水分条件。播前 2 d 装土施肥，每桶装干土 13 kg，基肥按比例与干土混合均匀，装土时控制土壤干容重为 1.35 $g\cdot cm^{-3}$，桶中插 2 根长 15 cm、直径 1.5 cm 的 PVC 管用于灌水，管周围均匀打孔，沿管壁裹一层纱网，装土后桶表面覆盖 500 g 蛭石防止土壤快速板结。2013 年 9 月 12 日在桶中央均匀播 5 粒种子，播种深度 5 cm，播种后灌水至 85% FWC。待冬油菜长出 3 片真叶后(2013 年 9 月 25 日)定苗，每桶留壮苗 1 株。在水分处理前 1 d，将各桶追施的氮肥在灌溉水中溶解后，沿 PVC 管均匀施入。冬油菜于 2014 年 5 月 22 日(播种后 253 d，253 DAS)收获。

1.3 测定项目与方法

1)土壤含水量：采用称重法确定灌水量和灌水时间，使土壤含水量控制在设定范围内。收获时，土壤含水量采用烘干法测定，每桶均匀选取 3 个测点，沿土壤深度方向每隔 5 cm 取 1 个土样，共 20 cm。

水分利用效率：用公式 $WUE=Y/ET$ 计算。式中，WUE 为作物水分利用效率，$kg\cdot m^{-3}$；Y 为收获时的籽粒产量，kg；ET 为全生育期耗水量，m^3。$ET=M-W_t$，M 为全生育期灌水量，W_t 为收获时的土壤贮水量。

2)叶绿素和光合速率：在冬油菜初花期(190 DAS)分别测定冬油菜的倒三叶的净光合速率和叶绿素含量。用 Li-6400 便携式光合测定仪在 10:00—12:00 测定各桶冬油菜倒三叶的净光合速率。用 96%的乙醇提取叶片色素后，采用分光光度计比色法测定叶片的叶绿素含量[16]。

3)生长指标和产量性状：冬油菜收获时，用卷尺分别测定各株冬油菜的株高、主花序长度和第 1 个有效分枝高度；用游标卡尺测定其根颈粗；记录分枝数量。测定完后将冬油菜的茎秆放于烘箱，105 ℃杀青 30 min 后，于 70 ℃烘干至恒重，测定地上部干物质量。

4)产量性状：冬油菜收获时，分别测定各株冬油菜的主花序角果数量和分枝花序角果数量，晒干后分别测定主花序籽粒产量和分枝花序籽粒产量，并分别测定其角果籽粒数和千粒重。

5)含油率和蛋白质：用近红外光谱分析仪(Foss, NIRSystem-5000)测定油菜主花序和分枝花序籽粒的含油率和蛋白质。

6)氮肥偏生产力($g\cdot g^{-1}$)=产量(g)/施氮量(g)。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 处理试验数据；PASW Statistics 18.0 软件进行主成分分析和方差分析，多

重比较采用 Duncan 新复极差法, 显著性水平为 α=0.05; 采用 OriginPro 8.5 软件作图。

2　结果与分析

2.1　施氮量对返青期不同水分处理冬油菜生长指标的影响

施氮量对返青期不同水分处理冬油菜的株高、主花序长度、有效分枝高度、根颈粗、有效分枝数和地上部干物质量有显著影响(表 1)。相同水分条件下, 除有效分枝高度随施氮量的增加而降低外, 其他各指标均随施氮量的增加, 先增加后下降, 并在 N_3 达到最大值。相同施氮水平下, 充分供水(W)条件下的冬油菜各生长指标均高于返青期水分胁迫(D)冬油菜的生长指标, 但 W 和 D 间冬油菜各生长指标的差值均随着施氮量的增加, 先减小后变大, 在 N_3 施氮水平下, 差值最小。

表 1　施氮量对不同水分处理冬油菜生长指标的影响

Table 1　Effects of nitrogen application on growth indexes of winter oilseed rape under different water treatments

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	主花序长度 Length of main raceme (cm)	有效分枝高度 Primary branch height (cm)	根颈粗 Taproot diameter (mm)	单株有效分枝数 Number of branches per plant	地上部干物质量 Shoot dry matter (g·plant^{-1})
N_0W	124.8±5.6c	54.9±3.4d	39.5±2.5a	20.5±1.4c	8.7±0.3d	93.8±2.4d
N_0D	119.7±6.2c	51.7±3.9e	36.7±2.3b	20.0±1.1c	7.5±0.5e	88.5±2.2e
N_1W	143.9±8.0b	63.3±5.0b	38.1±3.1a	23.3±1.2b	10.8±0.2b	105.3±5.6bc
N_1D	139.7±5.3b	61.5±2.7c	36.4±2.9b	23.3±1.4b	9.9±0.8c	100.2±6.1c
N_2W	153.2±7.6a	65.4±3.1a	34.8±2.4c	25.5±2.3a	11.5±0.7ab	114.7±4.5b
N_2D	150.3±8.8a	64.1±4.1ab	34.6±2.8c	24.5±2.1ab	11.0±0.2ab	112.5±5.3b
N_3W	157.0±6.5a	66.1±5.1a	34.1±3.5c	25.6±2.7a	12.5±1.3a	121.5±3.2a
N_3D	155.5±6.8a	65.6±3.4a	33.7±2.1c	25.5±2.7a	12.3±0.9a	120.8±2.3a
N_4W	152.5±7.3a	64.5±3.3ab	32.8±3.0cd	24.5±2.4ab	11.8±0.6a	116.2±2.1b
N_4D	149.9±9.1a	64.0±4.6ab	30.1±2.4d	24.4±2.8ab	10.3±0.3b	108.8±5.4bc

同一列数据后具有不同字母的表示处理间达到显著性检验(P<0.05)。N_0、N_1、N_2、N_3 和 N_4 分别表示每桶施氮量为 0 g、0.2 g、0.4 g、0.6 g 和 0.8 g; W 和 D 分别表示充分供水(土壤含水率为 70%~80%的田间持水率)和水分胁迫(土壤含水率为 50%~55%的田间持水率)。下同。Values followed by different letters in a column are significantly different (P < 0.05). N_0, N_1, N_2, N_3 and N_4 denote the nitrogen application rates of 0 g·barrel^{-1}, 0.2 g·barrel^{-1}, 0.4 g·barrel^{-1}, 0.6 g·barrel^{-1} and 0.8 g·barrel^{-1}, respectively; W and D denote full-water (70%–80% of the field capacity), deficit-water (50%–55% of the field capacity), respectively. The same below.

在不施氮(N_0)情况下, 除株高和根颈粗外, D 处理的主花序长度、有效分枝高度、单株有效分枝数和地上部干物质量均显著小于 W 处理, 表现为不足补偿。随着施氮量的增加, D 处理复水后的补偿效果明显改善。在 N_1 下, 除株高和根颈粗外, 其他各指标表现为不足补偿; 在 N_2 和 N_3 下, 各生长指标全部表现出等效补偿效果。继续增加施氮量, D 处理复水后的补偿效果有所降低。在 N_4 下, D 处理的单株有效分枝数显著小于 W 处理, 表现为不足补偿。可见, 返青期水分胁迫期间, 适量追施氮肥, 有利于复水后各生长指标的补偿。

2.2　施氮量对返青期不同水分处理冬油菜叶绿素含量和光合速率的影响

叶绿素是光合作用的主要色素, 在光吸收中起重要作用, 叶绿素含量的高低可反映出光合能力的强弱, 进而反映出作物体内能量的传递转化和干物质积累的能力。光合作用是植株生长的生理基础, 是直接关系到作物产量形成的主要机制, 光合速率在一定程度上可以反映光合作用的水平[17]。施氮量对返青期不同水分处理冬油菜的叶绿素含量和光合速率如图 1 所示。

由图 1a 分析可知, 在相同水分条件下, 随着施氮量的增加, 冬油菜初花期叶片的叶绿素含量呈先增加后降低的趋势, 施氮量 N_3 处理的叶绿素含量最大, 且显著大于其他各施氮量处理。N_2 和 N_4 处理的叶绿素含量不存在显著差异, 但均显著大于 N_0 和 N_1, 且 N_1 显著大于 N_0。在相同施氮量下, W 处理的叶绿素含量大于 D 处理, 二者差值随着施氮量的增加呈先降低后增加的趋势, 在 N_3 时差值最小。在 N_0 和 N_1 下, W 处理的叶绿素含量显著大于 D 处理; 在 N_2、N_3 和 N_4 下, 2 种水分处理冬油菜的叶绿素含量不存在显著差异。可见, 在返青期胁迫后复水, 叶绿素含量在 N_0 和 N_1 下表现为不足补偿, 在 N_2、N_3 和 N_4 下均表现出等效补偿。

施氮量对不同水分处理冬油菜花期叶片的光合速率有显著影响(图 1b)。在相同水分条件下, 光合速率随着施氮量的增加, 呈现先增加后降低的趋势, 在 N_3 处理下叶片光合速率显著大于其他施氮量处

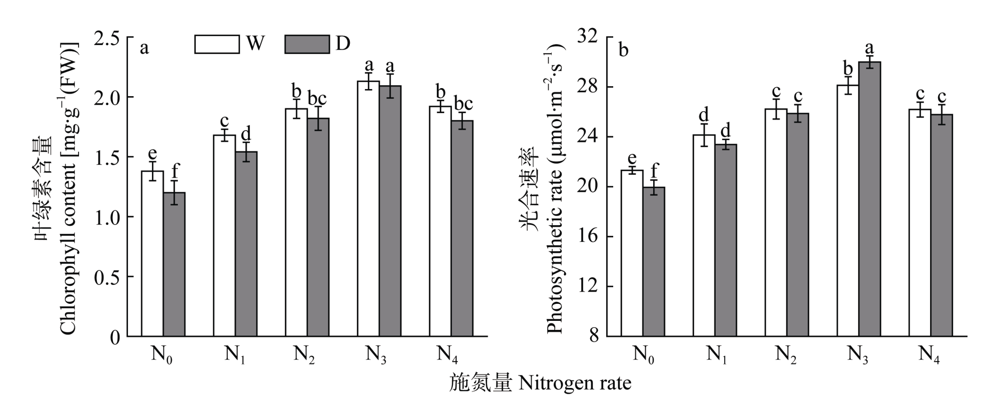


图 1　不同水氮处理下冬油菜的叶绿素含量(a)和光合速率(b)

Fig. 1　Chlorophyll contents (a) and photosynthetic rates (b) of winter oilseed rape under different water and nitrogen treatments

不同小写字母表示不同处理间差异显著(Duncan 法, $P<0.05$), 下同。Different letters above bars mean significant difference among treatments at $P < 0.05$. The same below.

理。在 N_0 下, D 处理的光合速率显著小于 W 处理; 在 N_1、N_2 和 N_4 下, 2 种水分处理冬油菜的光合速率均不存在显著差异; 在 N_3 下, D 处理的光合速率显著大于 W 处理。可见, 在返青期胁迫后复水, 光合速率在 N_0 下表现为不足补偿, 在 N_1、N_2 和 N_4 下表现出等效补偿, 在 N_3 下表现为超补偿。

2.3　施氮量对返青期不同水分处理冬油菜产量、氮肥偏生产力和水分利用效率的影响

适宜的水分条件和合理的养分供应是作物高产优质的基本保证, 是促进作物生长发育和提高水氮利用效率的重要途径。施氮量对返青期不同水分处理冬油菜的产量、产量构成和氮肥偏生产力有显著影响(表 2)。在相同水分条件下, 主花序角果数、分枝角果数、每角粒数、千粒重、主花序和分枝花序产量和总产量均表现出随施氮量的增加先增加后降低的趋势。除主花序角果数(在 N_2 达到最大)外, 产量及其他产量构成要素均在 N_3 达到最大。在 N_0 和 N_1 下, D 处理的分枝角果数、分枝产量和总产量均显著小于 W 处理, 且在 N_0 下, D 处理的千粒重也显著小于 W 处理; 在 N_2 下, W 处理的分枝产量显著大于 D 处理; 在 N_3 下, W 处理的各产量构成均与 D 处理无显著差异; 在 N_4 下, W 处理的分枝产量和总产量显著大于 D 处理。可见, 只有在 N_3 施氮水平下, 返青期胁迫并复水冬油菜的产量及产量构成才均能表现出等效补偿。在 N_1、N_2、N_3 和 N_4 施氮水平下, 2 种水分处理冬油菜的平均产量与 N_0 相比, 分别增产 9.0 g(37.1%)、14.1 g(58.1%)、21.3 g(87.6%)和 14.4 g (59.4%)。而且, 在 N_3 水平下, W 与 D 处理产量之间的差值最小(1.0 g), 显著小于 N_0(3.5 g)、N_1(2.9 g)、N_2 (1.9 g)、N_4(3.3 g)各施氮量水平。

表 2　施氮量对不同水分处理下冬油菜产量和氮肥偏生产力的影响

Table 2　Effects of different water and nitrogen treatments on yield and partial factor productivity of winter oilseed rape

处理 Treatment	主花序角果数 Pod number of main raceme (g·plant⁻¹)	分枝角果数 Pod number of branches (g·plant⁻¹)	每角粒数 Seed number per pod	千粒重 1000-seed weight (g)	主花序产量 Yield of main raceme (g·plant⁻¹)	分枝产量 Yield of branches (g·plant⁻¹)	总产量 Total yield (g·plant⁻¹)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity (g·g⁻¹)
N_0W	77.6±4.8b	263.2±26.2d	20.6±1.9d	3.40±0.14d	5.6±0.6c	20.4±1.8f	26.0±2.1f	43.3±2.9a
N_0D	76.7±5.1b	215.9±23.8e	20.1±1.1d	3.32±0.13e	5.1±0.8c	17.4±1.4g	22.5±1.8g	37.5±2.0b
N_1W	82.2±4.2ab	350.8±22.8ab	21.9±1.4c	3.61±0.11c	7.0±0.8ab	27.7±1.8d	34.7±2.4d	43.4±2.2a
N_1D	81.8±7.6ab	329.5±16.8c	21.5±0.9c	3.55±0.16cd	6.7±0.6b	25.1±1.7e	31.8±2.0e	39.8±2.3b
N_2W	86.1±4.3a	360.3±10.4ab	23.0±1.2ab	3.86±0.14b	7.3±0.7a	32.0±1.5b	39.3±2.8b	39.3±2.7b
N_2D	84.0±3.9a	348.9±14.1b	22.7±1.0b	3.82±0.19b	7.1±0.6ab	30.3±1.6c	37.4±2.5bc	37.4±3.0b
N_3W	81.2±6.4ab	372.4±29.4a	23.9±0.7a	3.97±0.15a	7.7±0.7a	38.3±1.1a	46.0±3.1a	38.3±3.2b
N_3D	80.9±6.9ab	374.9±23.5a	23.7±1.4a	3.94±0.24a	7.6±0.5a	37.4±1.9a	45.0±2.4a	37.5±2.2b
N_4W	80.2±3.2ab	358.2±18.8ab	23.2±1.1ab	3.88±0.18b	7.2±0.6a	33.1±1.6b	40.3±1.2b	28.8±2.4c
N_4D	80.0±7.1ab	333.1±21.1bc	22.8±1.8b	3.83±0.11b	7.0±0.6ab	30.0±1.3c	37.0±2.0c	26.4±3.8c

氮肥偏生产力是反映土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的指标。相同水分条件下, N_1 的氮肥偏生产力略大于 N_0, 二者不存在显著差异, 但均显著大于其他施氮处理, N_3 的氮肥偏生产力与 N_1 相比

降低 8.8%，产量提高 36.8%；在相同施氮水平下，W 处理的氮肥偏生产力均大于 D 处理，在 N_0 和 N_1 条件下，W 处理的氮肥偏生产力显著大于 D 处理，而在 N_2、N_3 和 N_4 条件下，2 种水分处理的氮肥偏生产力无显著差异，且在 N_3 条件下，2 种水分处理氮肥偏生产力的差异最小，D 处理仅比 W 处理降低 2.2%。

作物水分利用效率是评价节水效果的一项重要指标。在相同水分条件下，随着施氮量的增加，耗水量及水分利用效率均呈现先增加后降低的趋势，且均在 N_3 水平下最大(图 2)。N_2、N_3 和 N_4 的耗水量(三者之间无显著差异)显著大于 N_0 和 N_1(N_1 耗水量显著大于 N_0)。N_1、N_2、N_3、N_4 的 2 种水分处理下的平均耗水量和平均水分利用效率与 N_0 相比，分别提高 5.8 L(23.1%)、10.1 L(40.1%)、10.4 L(41.3%)、9.8 L (38.9%)和 0.11 kg·m^{-3}(11.4%)、0.13 kg·m^{-3}(12.9%)、0.32 kg·m^{-3}(32.9%)、0.14 kg·m^{-3}(14.7%)。W 与 D 处理水分利用效率之间的差值随着施氮量的增加呈先减小后增大的规律，在 N_2 水平下，二者水分利用效率相当，在 N_3 水平下，D 处理的水分利用效率大于 W 处理的水分利用效率(增幅为 3.8%)。N_4 处理的耗水量虽与 N_3 处理无显著差异，但 N_4 处理的产量却显著小于 N_3 处理，使 N_4 处理的水分利用效率低于 N_3 处理。

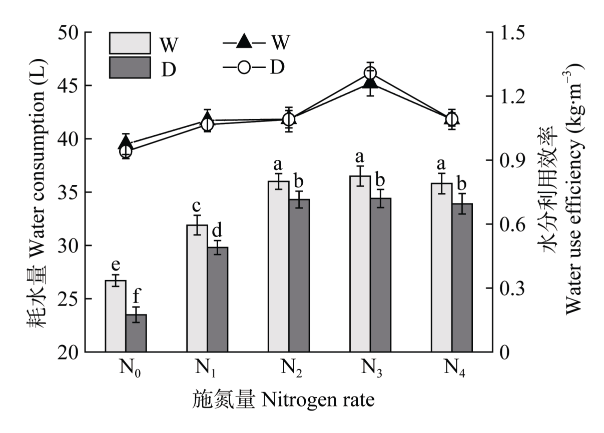


图 2　不同水氮处理下冬油菜的耗水量和水分利用效率
Fig. 2　Water consumption and water use efficiency of winter oilseed rape under different water and nitrogen treatments
柱状图和线形图分别表示耗水量和水分利用效率。Water consumption and water use efficiency are presented with bars and lines, respectively.

2.4　施氮量对返青期不同水分处理冬油菜含油率和蛋白质的影响

含油率和蛋白质含量是评价油菜籽品质的 2 个重要指标。施氮量对返青期不同水分处理后油菜籽的含油率和蛋白质含量有显著影响(表 3)。含油率随着施氮量的增加而降低，蛋白质含量却表现出相反的趋势；分枝花序角果籽粒的含油率和蛋白质含量大于主花序角果的含油率和蛋白质含量；在相同施氮情况下，D 处理的含油率和蛋白质含量均高于 W 处理，但二者差异不显著。

表 3　不同水氮处理对冬油菜含油率和蛋白质含量的影响
Table 3　Effects of different water and nitrogen treatments on oil and protein contents of winter oilseed rape

处理 Treatment	籽粒含油率 Grain oil content (%)		籽粒蛋白质含量 Grain protein content (%)	
	主花序 Main raceme	分枝花序 Branch raceme	主花序 Main raceme	分枝花序 Branch raceme
N_0W	46.5±0.5a	47.4±0.2a	20.1±0.3c	20.7±0.1c
N_0D	46.6±0.4a	47.9±0.2a	20.4±0.1c	21.4±0.4c
N_1W	43.4±0.2b	45.4±0.3ab	21.0±0.3c	21.7±0.3c
N_1D	43.8±0.3b	46.1±0.3ab	21.9±0.5bc	22.4±0.5bc
N_2W	42.6±0.4b	43.9±0.8b	22.4±0.4b	23.1±0.5bc
N_2D	42.9±0.1b	44.6±0.4b	23.3±0.2b	23.8±0.4b
N_3W	40.1±0.8c	41.3±0.5c	25.0±0.3a	25.7±0.2a
N_3D	40.5±0.4c	42.0±0.4c	25.8±0.4a	26.4±0.4a
N_4W	39.0±0.4d	39.8±0.3d	25.9±0.2a	26.5±0.1a
N_4D	39.3±0.5d	40.3±0.1d	26.1±0.3a	27.1±0.2a

N_1、N_2、N_3 和 N_4 的主花序和分枝花序角果籽粒的平均含油率与 N_0 相比，分别降低 1.9%、3.5%、5.3%、5.8%和 1.9%、3.4%、6.0%、7.6%；N_1、N_2、N_3 和 N_4 的主花序和分枝花序角果籽粒的平均蛋白质含量比 N_0 分别提高 1.2%、2.6%、5.2%、5.7%和 1.0%、2.4%、5.0%、5.8%。分枝花序角果籽粒的平均含油率和蛋白质含量较主花序角果籽粒分别提高 1.4%和 0.7%。D 处理下油菜籽的平均含油率和蛋白质含量分别比 W 处理提高 0.5%和 0.2%。

2.5　施氮量对返青期不同水分处理冬油菜各指标参数的主成分分析及评价

以不同水氮处理下冬油菜生长指标、生理指标、产量性状指标、耗水量和水分利用效率及品质指标为评价对象，进行主成分分析。从表 4 可以看出主成分 1 的特征值为 17.668，贡献率为 84.132%，主成分 2 特征值为 2.336，贡献率为 11.124%，前 2 个主成分累计贡献率达 95.256%，可解释差异产生的 95.256%。

通过主成分分析表 5 的初始因子载荷，将初始因子载荷矩阵中的 2 列数据输入到数据编辑窗口(为变量 B1、B2)，然后利用“Transformation Compute Variable”，在 Compute Variable 对话框中输入“A1=B1/SQR(17.668)”(第 2 主成分 SQR 后的括号中填 2.336)，即可得到特征向量 A1、A2(表 5)。

表 4 冬油菜各指标参数主分量的特征值和累计贡献率
Table 4 Eigenvalues and cumulative contribution proportions of principle components of the indices of winter oilseed rape

主分量 Principle component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution proportion (%)	累计特征值 Cumulative eigenvalues	累计贡献率 Cumulative contribution proportion (%)
1	17.668	84.132	0.841	84.132
2	2.336	11.124	0.953	95.256
3	0.563	2.683	0.979	97.939
4	0.248	1.182	0.991	99.121
5	0.129	0.615	0.997	99.736
6	0.028	0.133	0.998	99.870
7	0.021	0.101	0.999	99.970
8	0.006	0.027	1.000	99.998
9	0.000	0.002	1.000	100.000
10	0.000	0.000	1.000	100.000
11~22	0.000	0.000	1.000	100.000

通过表 5 给出的特征向量可以写出由标准化变量所表达的各主成分的关系式, 由于前 2 个主成分已反映全部信息的 95.256%。

以 2 个主成分的贡献率为权数求加权均值, 得主成分综合得分(E):

$$E=0.841\,3\times \text{Prin1}+0.111\,2\times \text{Prin2} \tag{1}$$

这个综合得分可以作为不同水氮处理对冬油菜生理生长、产量性状、耗水量和水分利用效率及品质影响的综合评价指标。将不同水氮处理下各参数带入该式得主成分综合得分, 如表 6 所示。

结合不同水氮处理条件对冬油菜生理生长、产量构成、耗水量和水分利用效率及品质影响的综合评价得分, 哪个处理的综合得分越高, 表明这个处理对测定参数的影响越大, 结合参数具体正负影响, 即可评定哪个处理最优。可以看出, N_3D 处理的综合得分最高, N_0D 处理的综合得分最低。说明 N_3D 处理促进冬油菜生理生长, 提高产量

表 5 冬油菜各指标在两个主成分下的初始因子载荷矩阵和相关矩阵的特征向量
Table 5 Component load matrix and eigenvectors of correlation matrix of the indices of winter oilseed rape under the first two principal components

指标 Index	成分 Component		特征向量 Eigenvector	
	1	2	Prin. 1 (A1)	Prin. 2 (A2)
产量 Yield (*x*1)	0.991	0.118	0.236	0.077
耗水量 Water consumption (*x*2)	0.970	0.111	0.231	0.073
株高 Plant height (*x*3)	0.990	0.124	0.236	0.081
主花序长度 Length of main raceme (*x*4)	0.785	0.590	0.187	0.386
有效分枝高度 Primary branch height (*x*5)	–0.732	0.562	–0.174	0.368
根颈粗 Taproot diameter (*x*6)	0.938	0.187	0.223	0.122
有效分枝数 Number of branches (*x*7)	0.987	0.096	0.235	0.063
地上部干物质重 Shoot dry matter (*x*8)	0.990	–0.030	0.236	–0.020
叶绿素含量 Chlorophyll content (*x*9)	0.942	–0.073	0.224	–0.048
光合速率 Photosynthetic rate (*x*10)	0.982	–0.044	0.234	–0.029
主花序角果数 Pod number of main raceme (*x*11)	0.331	0.848	0.079	0.555
分枝角果数 Pod number of branches (*x*12)	0.916	0.390	0.218	0.255
角果粒数 Seed number per pod (*x*13)	0.990	–0.017	0.236	–0.011
千粒重 1000-seed weight (*x*14)	0.977	–0.159	0.232	–0.104
主花序产量 Yield of main raceme (*x*15)	0.982	0.171	0.234	0.112
分枝产量 Yield of branches (*x*16)	0.991	0.110	0.236	0.072
氮肥偏生产力 Partial factor productivity (*x*17)	0.984	0.103	0.232	0.067
水分利用效率 Water use efficiency (*x*18)	0.976	0.095	0.232	0.062
主花序含油率 Oil content of main raceme (*x*19)	–0.930	0.256	–0.221	0.167
分枝花序含油率 Oil content of branches (*x*20)	–0.893	0.370	–0.212	0.242
主花序蛋白质 Protein of main raceme (*x*21)	0.872	–0.441	0.207	–0.289
分枝花序蛋白质 Protein of branches (*x*22)	0.848	–0.484	0.202	–0.317

表 6　不同水氮处理对冬油菜生长、产量、品质和水分利用影响的综合得分
Table 6　Comprehensive scores of effects of different water and nitrogen treatments on growth, yield, quality and water use of winter oilseed rape

处理 Treatment	N_0W	N_0D	N_1W	N_1D	N_2W	N_2D	N_3W	N_3D	N_4W	N_4D
综合得分 Comprehensive score	134.6	119.3	170.6	162.3	180.5	175.6	188.2	190.9	180.3	171.8

和水分利用效率、保证品质的综合效果最好，而 N_0D 处理最差。

3　讨论

3.1　复水补偿效应

在半干旱地区，作物的生长发育经常处于干湿交替、多变低水的环境之中。水分亏缺会对作物造成伤害，但并非每个生育时期任何程度的缺水都会使作物减产，往往某一生育阶段适度的水分亏缺解除后作物的生长发育乃至最终籽粒产量的形成会产生补偿效应。作物复水后产生的补偿效应在生长发育、光合作用、水分利用、物质运输和籽粒产量等方面都有表现[18]。作物产量和品质受水分亏缺的影响程度取决于水分亏缺发生的时期，持续时间和水分亏缺的程度[19]。丁端锋等[20]发现玉米(*Zea mays*)在苗期经受不同程度的干旱胁迫后复水，植株的干物质积累、蒸腾速率和根系活力均表现出不同程度的补偿生长效应。刘吉利等[10]通过对花生苗期干旱后复水的研究发现干旱期间叶片的光合性能降低，复水后叶片光合性能迅速恢复到正常水平，在减少耗水量的同时不影响产量，花生的平均水分利用效率提高 43.9%。闫志利等[21]研究表明，干旱胁迫导致各生育期豌豆(*Pisum sativum*)根系脱落酸和吲哚乙酸含量增加，赤霉素和玉米素含量减少，且随干旱胁迫程度的加重变化量增大。旱后复水可对各生育期豌豆根系内源激素的含量产生补偿效应，其补偿量决定于豌豆生育时期、干旱胁迫强度和复水历时。李瑞等[22]通过研究局部水分胁迫后复水对玉米根系生长的影响发现，适度胁迫后复水有利于作物根系总面积增长，但对总根长、根干重无显著影响，根系补偿效应与胁迫强度及复水的时间有关。本研究对不同施氮量下返青期水分胁迫后复水冬油菜各生长、生理和产量的补偿效应也得到了相似的结果，各施氮处理冬油菜的地上部干物质重、每角粒数和千粒重均表现出等效补偿效应；叶绿素和单株角果数除 N_1 为不足补偿外，其他施氮处理均为等效补偿；光合速率除 N_3 表现出超补偿效应，其他施氮处理则为等效补偿；N_1、N_4 的产量显著小于充分供水条件下的产量，而 N_2、N_3 的产量则与充分供水无显著差异。可见，对冬油菜在返青期进行适宜的水分胁迫后复水，各施氮处理的生长、生理和籽粒产量均能得到一定的补偿作用。

3.2　水肥协同补偿效应

水分和养分既是旱农生产的最大障碍因素，也是人类最易控制的物质投入。在生产实际中，水分和养分是密不可分的，两因素间的交互作用可以通过人为调控措施进行转变。旱地农业中植物营养的基本问题在于如何在水分受限制的条件下合理使用肥料，达到“以肥调水”的目的，提高作物的水分利用效率，增强抗旱性，促进作物对有限水资源的充分利用，防止不合理施肥造成的土壤和水体污染，获得最佳生态经济效益[23]。刘小刚等[24]试验结果表明水分胁迫可使春玉米叶片丙二醛含量、可溶性糖含量明显升高，使过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性有所降低，施氮能保证叶片在抽雄期前可溶性糖含量、过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性保持较高水平。郝树荣等[25]发现高水高肥并不一定高产，轻旱与低氮具有明显的协同互作效应，在保产的同时达到节水的目的。马守臣等[26]研究表明复合肥+有机肥配施处理的小麦(*Triticum aestivum*)在水分亏缺期间光合速率没有受到显著影响，复水后光合速率表现出超补偿效应，且小麦稳产性显著高于不施肥处理。褚丽丽等[14]研究发现大豆(*Glycine max*)产量的补偿或超补偿效应的产生是水分胁迫和氮素营养合力作用的结果，任一条件的缺失都会影响产量补偿效应的产生。王寅等[27]试验发现在干旱胁迫下施肥对油菜籽的增产效果明显高于适时灌溉条件，施肥是油菜干旱胁迫下正常生长发育和提高产量的有效措施。

本研究中，不施氮(N_0)情况下，返青期水分胁迫(D)处理的地上部干物质量、叶绿素、光合速率、产量和水分利用效率均显著小于充分供水(W)处理，表现出明显的不足补偿效果。随着施氮量的增加，D 处理的地上部干物质量、叶绿素、光合速率、产量和水分利用效率的补偿效果显著增加。尤其是在 N_3 下，D 处理的各生长、产量性状、品质指标和叶绿素含量表现出等效补偿效果；光合效率和水分利用效率表现出超补偿效果。再增加施氮量(N_4)，各指标的

补偿效果有明显降低趋势。这可能是因为适量施氮增加了根系附近的养分含量，缓解了干旱胁迫引起的根际土壤养分下降的状况，适量的养分供应增加了冬油菜的根系活力和地上部生产力，进一步加强了植株对养分的吸收利用能力，从而更有效地提高了增产幅度。而少量和过量施氮，均不能使冬油菜在返青期水分胁迫及复水条件下提高产量和水分利用效率，这可能是因为少量和过量施氮在复水后冬油菜叶片的叶绿素含量和光合速率得不到充分的补偿效应，致使冬油菜的角果数量、每角粒数和千粒重较低。

在水分胁迫条件下，通过合理施肥，促进根系下扎等措施在一定程度上可显著提高作物水分利用效率，水分胁迫对作物产生的影响一定程度上是从根部引起的。因此，不同施氮量对返青期不同水分处理冬油菜的根系特征有待进一步研究。

4 结论

本研究结果表明：在冬油菜返青期水分胁迫时，适量增施氮肥能够显著提高冬油菜在生长、生理、产量和水分利用效率的补偿效果，少量或过量增施氮肥的补偿效果均不明显。在本研究中，施氮量 N_3(折合 90 kg·hm^{-2})的补偿效果最佳。在 N_3 施氮水平下，D 处理冬油菜的各生长指标、叶绿素含量和籽粒产量均与 W 处理无显著差异，表现为等效补偿效果；而 D 处理冬油菜初花期的光合速率显著大于 W 处理，表现为超补偿效果；D 处理的产量比 W 处理降低 2.2%，水分利用效率提高 3.8%。对各生长、生理、产量和品质等指标进行主成分分析发现，N_3D 处理的主成分分析综合得分最高。可见，N_3D 处理促进冬油菜生理生长，提高产量和水分利用效率，保证品质的综合效果最好。该研究可为甘蓝型冬油菜在返青期调亏灌溉条件下确定合理的施氮量提供理论依据。

参考文献 References

[1] 王汉中. 我国油菜产需形势分析及产业发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1): 101–105
Wang H Z. Strategy for rapeseed industry development based on the analysis of rapeseed production and demand in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(1): 101–105

[2] 张树杰, 王汉中. 我国油菜生产应对气候变化的对策和措施分析[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 114–122
Zhang S J, Wang H Z. Policies and strategies analyses of rapeseed production response to climate change in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(1): 114–122

[3] 殷艳, 廖星, 余波, 等. 我国油菜生产区域布局演变和成因分析[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(1): 147–151
Yin Y, Liao X, Yu B, et al. Regional distribution evolvement and development tendency of Chinese rapeseed production[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(1): 147–151

[4] 郭相平, 张烈君, 王琴, 等. 作物水分胁迫补偿效应研究进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 634–637
Guo X P, Zhang L J, Wang Q, et al. Advances in compensatory effects response to water stress[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2005, 33(6): 634–637

[5] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116–123
Kou D, Su D R, Wu D, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 116–123

[6] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, et al. Modifying the ‘pulse-reserve’ paradigm for deserts of North America: Precipitation pulses, soil water, and plant responses[J]. Oecologia, 2004, 141(2): 194–210

[7] 薛惠云, 张永江, 刘连涛, 等. 干旱胁迫与复水对棉花叶片光谱、光合和荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 2386–2393
Xue H Y, Zhang Y J, Liu L T, et al. Responses of spectral reflectance, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in cotton during drought stress and rewatering[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(1): 2386–2393

[8] Acevedo E, Hsiao T C, Henderson D W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status[J]. Plant Physiology, 1971, 48(5): 631–636

[9] 曹永慧, 周本智, 陈双林, 等. 不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7421–7429
Cao Y H, Zhou B Z, Chen S L, et al. Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7421–7429

[10] 刘吉利, 赵长星, 吴娜, 等. 苗期干旱及复水对花生光合特性及水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 469–476
Liu J L, Zhao C X, Wu N, et al. Effects of drought and rewatering at seedling stage on photosynthetic characteristics and water use efficiency of peanut[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 469–476

[11] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523–536
Zhao L Y, Deng X P, Shan L. A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 523–536

[12] 李世清, 田霄鸿, 李生秀. 养分对旱地小麦水分胁迫的生理补偿效应[J]. 西北植物学报, 2000, 20(1): 22–28
Li S Q, Tian X H, Li S X. Physiological compensation effects of nutrient on winter wheat in dryland[J]. Acta Botanica

Boreali-Occidentalia Sinica, 2000, 20(1): 22–28

[13] 张亚洁, 周彧然, 杜斌, 等. 不同种植方式下氮素营养对陆稻和水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1005–1013
Zhang Y J, Zhou Y R, Du B, et al. Effects of nitrogen nutrition on grain yield of upland rice and paddy rice under different cultivation methods[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(6): 1005–1013

[14] 褚丽丽, 张忠学. 氮素营养与水分胁迫对大豆产量补偿效应的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2665–2670
Chu L L, Zhang Z X. Effects of nitrogen nutrition and water stress on compensation effect of the yield of soybean[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(10): 2665–2670

[15] 徐俊增, 彭世彰, 魏征, 等. 不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 72–76
Xu J Z, Peng S Z, Wei Z, et al. Characteristics of rice leaf photosynthetic light response curve with different water and nitrogen regulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 72–76

[16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74–77
Gao J F. Experimental Guidance for Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 74–77

[17] 贾志红, 易建华, 孙在军. 不同覆盖物对烤烟根温及生长和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2075–2078
Jia Z H, Yi J H, Sun Z J. Effects of different mulches on rhizosphere temperature, growth, and physiological properties of flue-cured tobacco[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2075–2078

[18] 娄成后, 王学臣. 作物产量形成的生理学基础[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 138
Lou C H, Wang X C. Physiology Base of Crop Yield Formation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 138

[19] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24–27
Cai H J, Kang S Z, Zhang Z H, et al. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 24–27

[20] 丁端锋, 蔡焕杰, 王健, 等. 玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 64–67
Ding D F, Cai H J, Wang J, et al. A study on compensative growth of maize under regulated deficit irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 64–67

[21] 闫志利, 轩春香, 牛俊义, 等. 干旱胁迫及复水对豌豆根系内源激素含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 297–301
Yan Z L, Xuan C X, Niu J Y, et al. Effect of drought stress and water recovery on endogenous hormone content in roots of pea[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 297–301

[22] 李瑞, 胡田田, 牛晓丽, 等. 局部水分胁迫对玉米根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1371–1376
Li R, Hu T T, Niu X L, et al. Effect of partial root-zone drought stress on root growth of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(11): 1371–1376

[23] 刘晓冰, 王光华, 金剑, 等. 作物根际和产量生理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 324–356
Liu X B, Wang G H, Jin J, et al. Physiological Research of Crop Rhizosphere and Production[M]. Beijing: Science Press, 2010: 324–326

[24] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 调亏灌溉和施氮对玉米叶片保护系统的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1080–1085
Liu X G, Zhang F C, Yang Q L, et al. Effect of regulated deficit irrigation and nitrogen fertilization on maize leaf protective system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(6): 1080–1085

[25] 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 92–96
Hao S R, Zheng J, Feng Y Z, et al. Aftereffects of water-nitrogen interaction on rice at jointing stage[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(3): 92–96

[26] 马守臣, 张绪成, 段爱旺, 等. 施肥对冬小麦的水分调亏灌溉效应的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 139–143
Ma S C, Zhang X C, Duan A W, et al. Regulated deficit irrigation effect of winter wheat under different fertilization treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 139–143

[27] 王寅, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 越冬期干旱胁迫对油菜施肥效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1203–1208
Wang Y, Lu J W, Li X K, et al. Effects of drought stress on fertilizer use efficiency of rapeseed during wintering[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1203–1208